

收进结构的地震反应特征

谢 闽 生 麦 淑 良 陈 忠 汉

(土木工程系)

摘 要

本文详细讨论了收进结构在弹性状态下的地震反应和基本振型、高振型对这类结构反应的贡献,分析了钢筋混凝土结构的非线性动力特性,以及突出物刚度的取值问题。

前 言

在文[1]、[2]中,我们提出了计算单层和多层突出物的收进结构剪力的计算公式,但还没有对这类结构的动力特性进行讨论。

J. L. Humar 等在文[3]中对这类型的结构进行了大量的定性分析,认为在地震中,这类结构往往在上下结构交界处产生很大的反应——槽口效应。这种反应和突出物的高宽比有关,高宽比越大,这种效应越强烈。

在文[4]中,钟万镒、林家浩通过对收进结构输入正弦波和 Elcenter 波作弹性分析后指出,增大突出物的刚度并不一定有利于减少突出物的层间变形。当上下结构的频率重合时,可用减少突出物刚度的办法来降低突出物的层间变形。

本文比较了收进结构和均匀结构地震反应的同异点。

文中选取了如图 1 的基本框架*。当许多同一高度的基本框架组合在一起,便为如图 2(a)所示的均匀结构。当许多不同高度的基本框架按某一规则组合在一起,便为图 2(b)所示的收进结构。图 2(c)为收进结构的平面图。

这时收进结构的参数仅为两个。

1. 突出物高度和整个结构高度的比值

$$L = h/H$$

式中, L 为高度比, h 为突出物的高度。

2. 突出物的面积和底层结构面积的比值

$$R_s = A' / A$$

本文1986年4月10日收到。

* 计算模型取法参照文[3]。

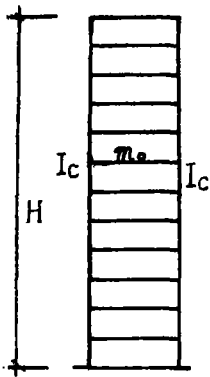
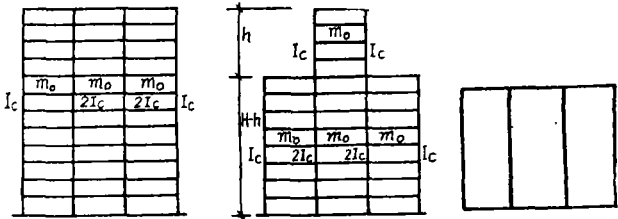


图 1 基本框架



(a)均匀结构 (b)收进结构 (c)收进结构的平面

图 2 结构计算模型

式中， A' 为突出物的面积。 R_s 里包含了上下结构的质量比

$$m' = mR_s$$

式中， m' 为突出物的楼层质量。

同文献[3]一致， R_s 也包含了上下结构的层间侧移刚度比

$$K' = R_s K$$

式中， K' 为突出物的侧移层间刚度。

本文仅讨论面积比为 $\frac{1}{25}$ 和 $\frac{1}{5}$ ，高度比分别为 $\frac{2}{12}$ ， $\frac{4}{12}$ ， $\frac{6}{12}$ ， $\frac{8}{12}$ 组合的 8 种情况（图 2 仅为收进结构示意图）。所用结构为 12 层钢筋混凝土结构。

弹性阶段动力反应分析

本文用反应谱法进行计算。当上下结构频率重合时用改进 SRSS 法^[1, 2]，不重合时用 SRSS 法，结果如图 3 所示。

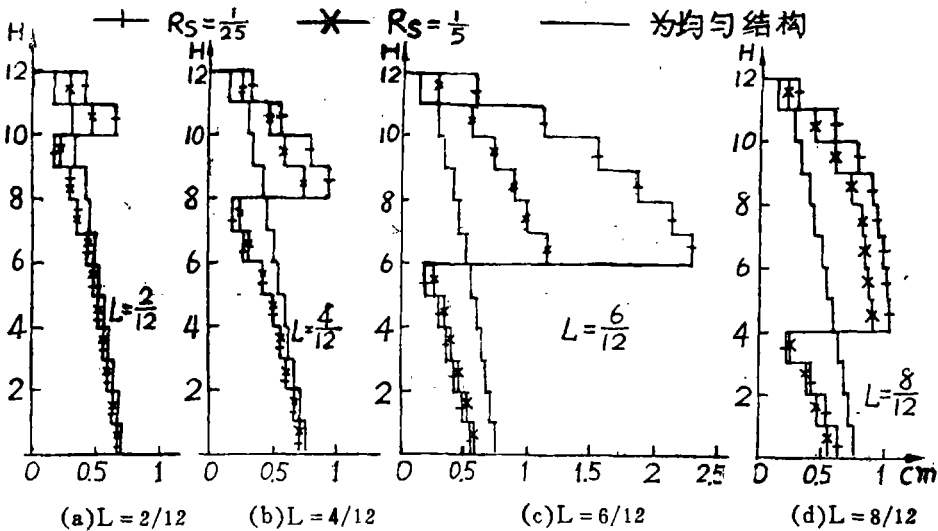


图 3 L 为 2/12、4/12、6/12、8/12 及均匀结构的层间位移

均匀结构的层间最大位移反应往往发生在底层，而收进结构则多发生在收进的交界层。若不考虑 $L = \frac{6}{12}$ 的情况，则收进处的层间位移反应取决于上部结构的高宽比，对不同的 R_s 值，收进层的最大反应发生在 $L = \frac{8}{12}$ 的情况。这时的结论和 Humar 等的结论一致；当收进结构突出物高宽比越大时，收进层的反应也就越强烈。当考虑 $L = \frac{6}{12}$ 时，收进层的最大反应不是发生在 $L = \frac{8}{12}$ 的情况下，而是发生在 $L = \frac{6}{12}$ 的情况下，这时上下结构的频率相重合。

收进结构的基底层间位移反应和均匀结构相比有明显减小，对 $R_s = \frac{1}{25}$ 的情况，这种减小和收进处层间位移的增大恰恰相反，它不仅与突出物的高宽比有关，而且还与上下结构的动力参数有关，当上下频率相重合时基底层间位移的反应达到最小值。

基本振型及高振型对结构反应的影响

本文用反应谱法算了各种收进结构的第一振型及前六个振型组合的层间位移结果。如图 4 所示。

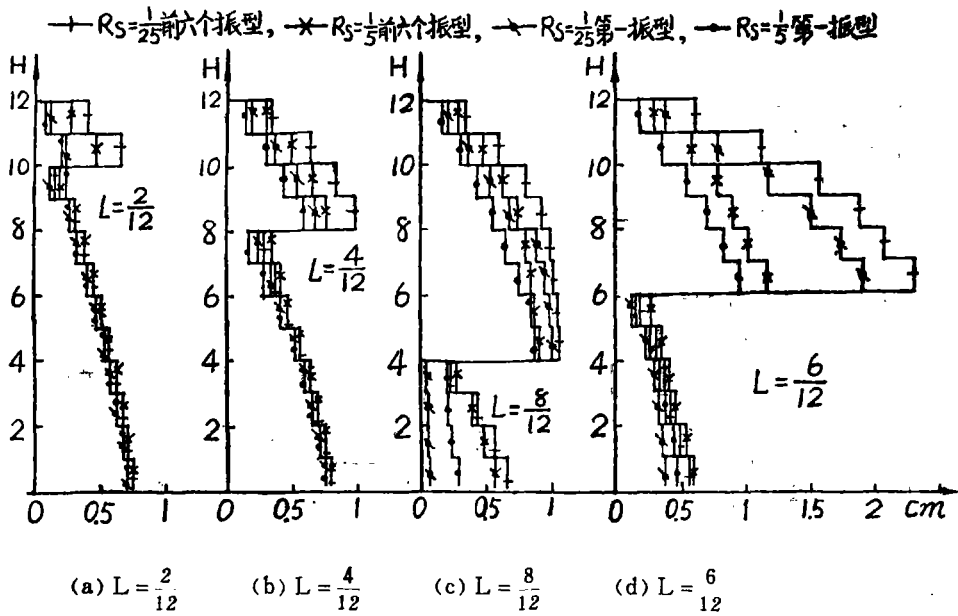


图4 L 分别为 $\frac{2}{12}$ 、 $\frac{4}{12}$ 、 $\frac{8}{12}$ 、 $\frac{6}{12}$ 时，第一振型及前六个振型组合对层间位移的贡献

以往大量的统计结果表明，对一般均匀结构，高振型对基底反应的影响不大，而主要是

影响上部结构。基底反应的大小主要受第一振型的影响。今将高振型及基本振型对收进结构的影响说明如下。

在文[2]中,收进结构第一振型不同于均匀结构第一振型,可近似为两条斜线组成的折线,第二条斜线的转折点在结构的收进处。

由图4可见,第一振型对收进层反应的贡献随着结构 L 的增加而增加,当 $L = \frac{8}{12}$ 时,收进层的反应主要来源于第一振型的影响。

第一振型对基底反应的影响随着结构高宽比的增加而降低,当 $L = \frac{8}{12}$ 时,在 $R_s = \frac{1}{5}$ 的情况下占42%,而在 $R_s = \frac{1}{25}$ 的情况下仅占9%。

这是由于上部结构的第一频率小于下部结构第一频率的原故。即插入频率为整个结构的基频,而与插入频率相对应的振型系数如图5所示。可见下部结构的振型系数很小。

图4还说明高振型对顶层的影响起主要作用。当 $R = \frac{1}{25}$, $L = \frac{2}{12}, \frac{4}{12}$ 时,高振型对顶层的影响分别为总反应的71%和48%,但对基底反应的影响却很小。随着结构高宽比的增加,其对结构基底反应的影响也逐渐明

显。当 $R_s = \frac{1}{25}$, L 分别为 $\frac{6}{12}, \frac{8}{12}$ 时,其影响分别为总反应的30%和91%。

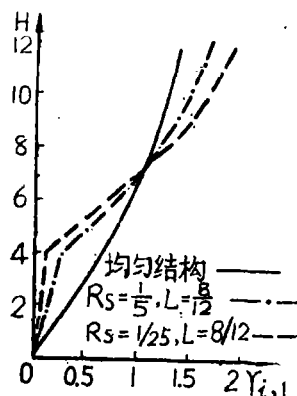


图5 $L = \frac{8}{12}$ 的第一振型系数

收进结构的非线性反应

强烈的地震和其它种类的使用荷载相比仍属于一种偶然出现的荷载,其概率很小,所以抗震规范制订的原则是小震不坏,大震不倒。在大震情况下,结构通常都进入了非线性状态,所以研究收进结构的非线性状态的动力特性是必要的。

屈服剪力强度比为

$$f_i = R_{y,i} / R_{e,i}$$

式中, $R_{e,i}$ 是第 i 层最大层间弹性剪力, $R_{y,i}$ 是第 i 层屈服层间剪力。

文献[5]表明,当某层的屈服剪力强度比小于其它各层时,该层称为薄弱层。在地震荷载作用下,将出现塑性变形集中。当 f_i 为常数时,即使层间变形不均匀,也比有薄弱层的情况均匀些。

本文仅讨论 f_i 为常数时收进结构的非线性动力特性。大量的研究表明,对同一地震荷载,当 f_i 为不同数值时,延性系数沿结构高度的分布形状大致相似。据此,本文仅讨论 $f_i = 0.5$ 的情况。

延性系数定义为

$$\mu = \frac{\Delta_{\mu,i}}{\Delta_{y,i}}$$

式中, $\Delta_{\mu,i}$ 为第 i 层最大层间位移; $\Delta_{y,i}$ 为第 i 层屈服点位移。

滞回曲线模型取退化双线性, 如图 6 所示, $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ 。

计算结果如图 7、8 所示。

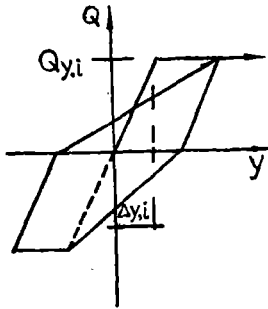


图6 滞回曲线

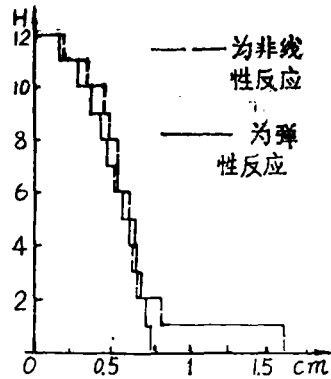
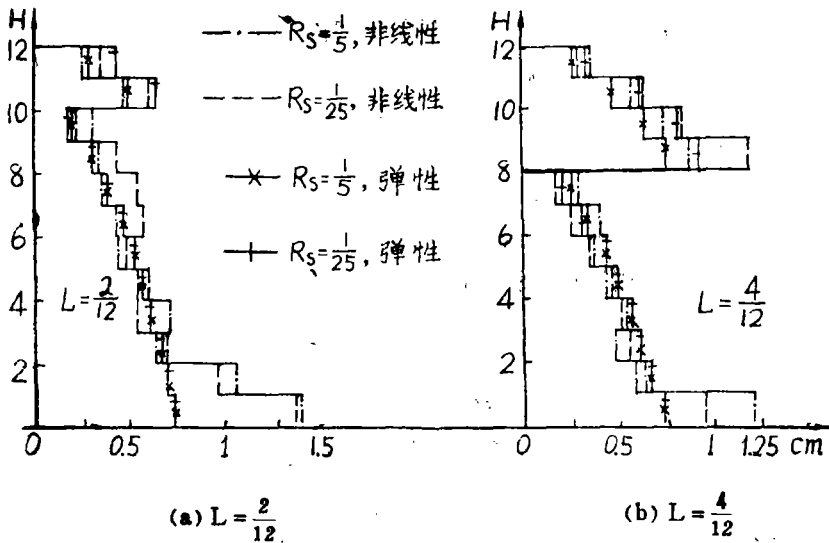


图7 均匀结构非线性及线性层间位移

尽管文中取结构的屈服剪力强度比 f_v 为常数, 但对均匀结构而言却在底层出现了塑性变形集中。对于收进结构, 随着突出物高宽比的增加, 基底塑性变形集中的情况逐渐减小, 收进层的塑性变形却逐渐增大。

当 $L = \frac{6}{12}$ 时, 收进层的层间位移反应不同于 L 取其它值的情况——塑性变形接近或大于弹性变形, 而是明显地小于结构的弹性变形。



(a) $L = \frac{2}{12}$

(b) $L = \frac{4}{12}$

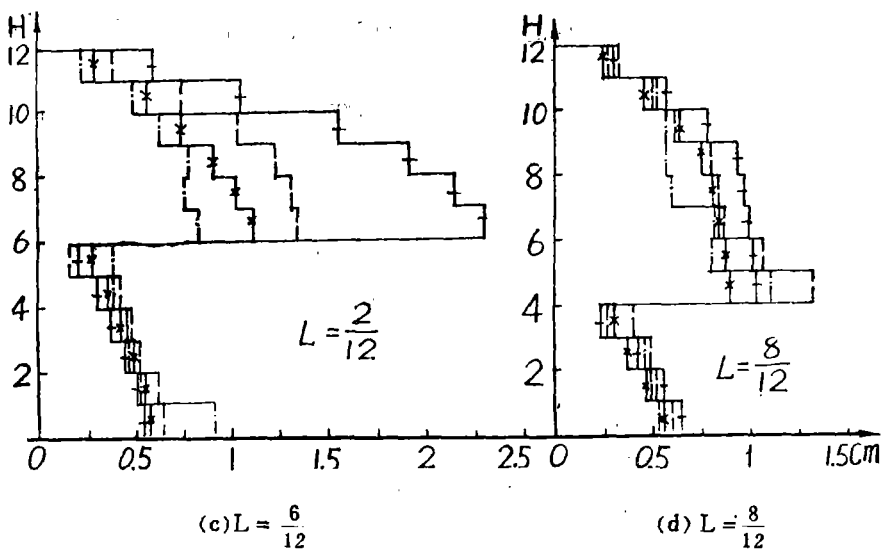


图8 L 分别为 $\frac{2}{12}$ 、 $\frac{4}{12}$ 、 $\frac{6}{12}$ 和 $\frac{8}{12}$ 的非线性及线性层间位移

增大突出物刚度后的弹塑性分析

Humar 等在文[3]中仅讨论了收进结构质量与刚度成比例的情况。在实际情况中，这意味着柱子截面伸到结构的收进处削弱了。若下部结构的柱子在收进处不削弱，在本文的收进结构的计算模型中意味着突出物刚度增加一倍。即图2(b)中突出物的边柱惯性矩的 I_0 增至 $2I_0$ 。

文中先用反应谱法对其进行弹性分析，计算结果如图9所示。

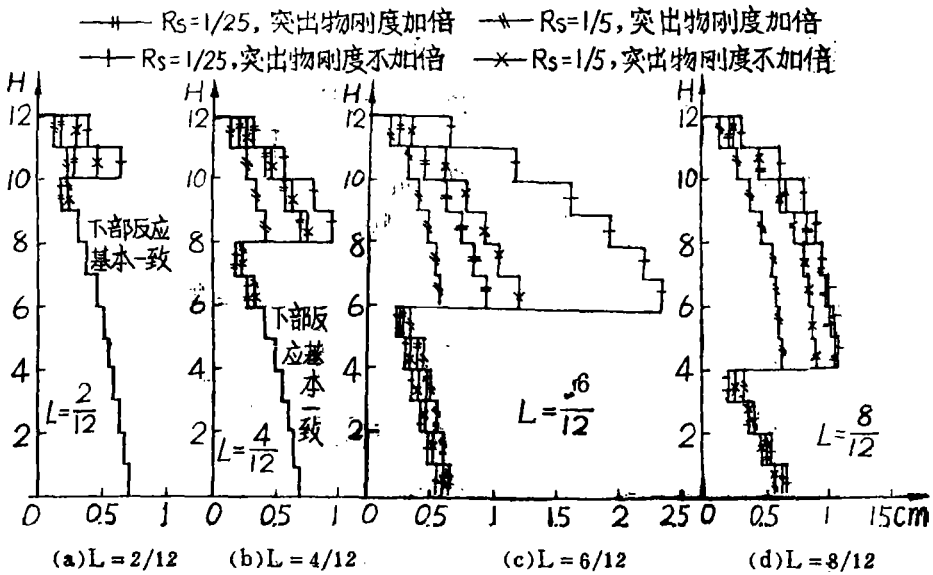


图9 L 为 $2/12$ 、 $4/12$ 、 $6/12$ 、 $8/12$ 时，增加突出物刚度的弹性层间位移

在弹性阶段,大多数情况的收进层的层间位移反应大大减少了.特别当 $L = \frac{6}{12}$ 时,由于上部结构的频率避开了下部结构的频率,反应成倍地下降.但当 $R_s = \frac{1}{25}$, $L = \frac{8}{12}$ 时,收进的反应降低却不多,仅为20%.在这种情况下,收进层的反应降低并不明显地依赖于刚度的增加(幸好这种形式的结构在日常工程中是不多见的).

对结构进行非线性分析时,计算所需的参数取法均同前文,即: $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$, $f_i = 0.5$ ($i = 1, 2, \dots, 12$),滞回曲线为退化双线性型.算得的结果如图10所示.

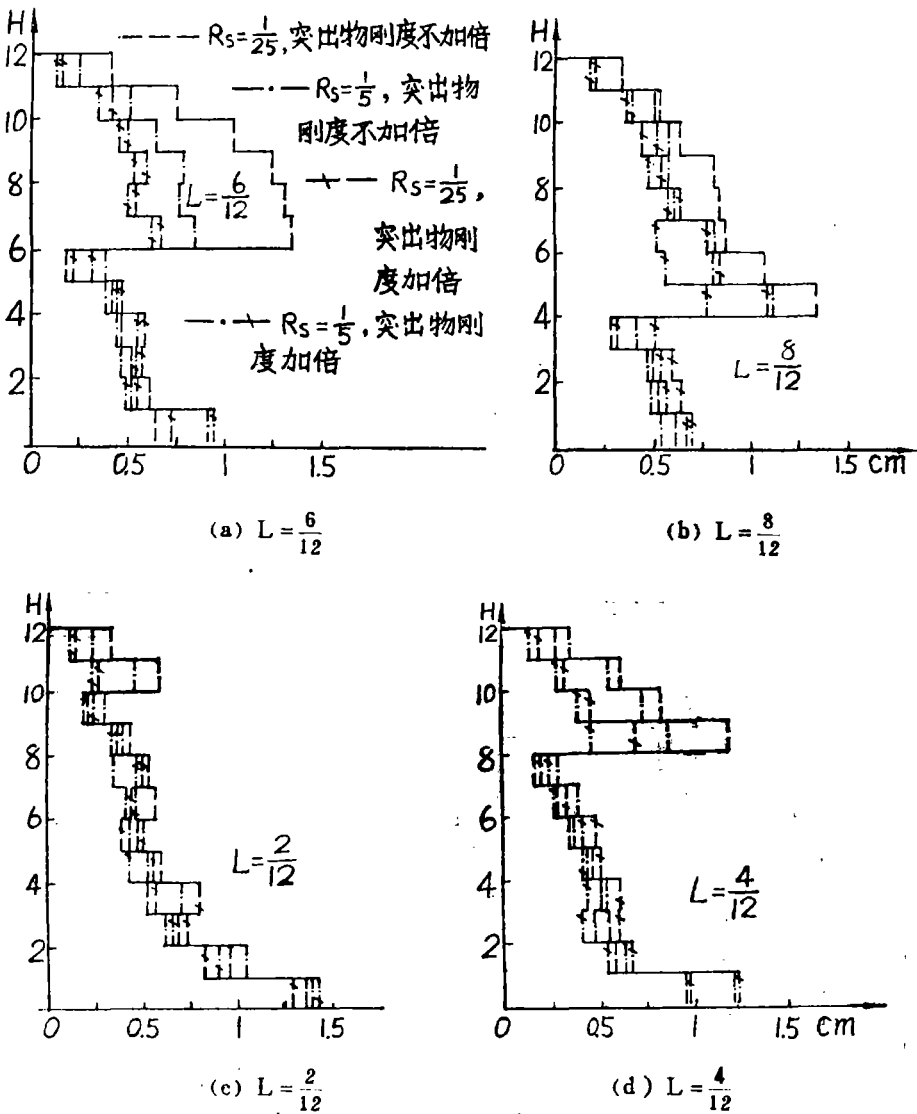


图 10 L 为 $\frac{6}{12}$ 、 $\frac{8}{12}$ 、 $\frac{2}{12}$ 和 $\frac{4}{12}$ 时, 不同突出物刚度的非线性层间位移

除 $R_s = \frac{1}{25}$, $L = \frac{8}{12}$ 的情况外, 收进层的非线性反应的层间位移在大多数情况下大约仅为质量和刚度成比例情况下非线性反应的一半。

由此可见, 在设计时, 如削弱收进柱子的截面, 并使得上下结构的频率重合或接近, 突出物将导致很大的反应。

突出物刚度合理取值讨论

文献[4]讨论了收进结构突出物质量和下部结构质量相差很大情况下的刚度取值问题, 认为用削弱刚度的办法避开共振区将减小突出物的位移反应。

但当突出物质量和下部结构质量相差不大时, 如 $R_s = \frac{1}{5}$, $L = \frac{6}{12}$, 上下结构的频率重合。随着突出物刚度的降低, 收进处的层间位移进一步增大, 这时, 并不能减少收进层的位移。

当突出物的质量下降, 如 $R_s = \frac{1}{25}$, $L = \frac{6}{12}$, 收进层的层间位移达极大值。把突出物的刚度降低0.5%, 收进层的层间位移达极小值。图11为结构在弹性阶段的计算结果, 可见这时层间位移即使达极小值, 但下降的并不明显。

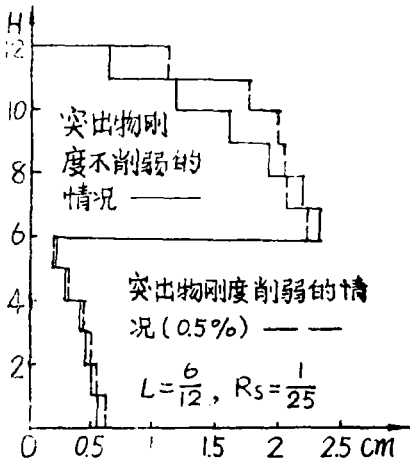


图11 弹性层间位移比较

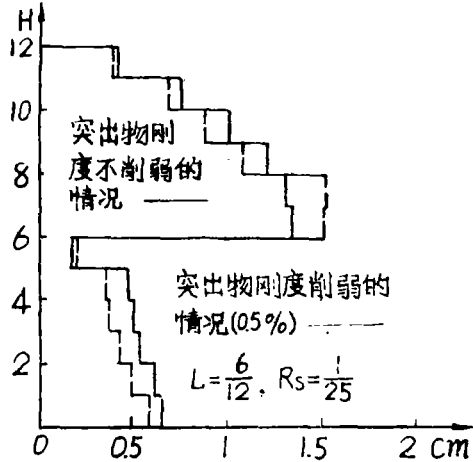


图12 非线性层间位移比较

本文取屈服剪力强度比 $f_t = 0.5$, $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$, 滞回曲线为退化双线性。对这两种情况进行非线性分析, 图12为计算的结果。发现这时收进层的反应在降低刚度时大于不降低刚度时的情况。

由上述分析可知, 在突出物质量不是很小的情况下, 用降低刚度的办法以达到降低收进层层间位移是不可取的。

结 语

1. 收进结构的反应不仅与突出物的高宽比有关,而且十分显著地依赖于上下结构的动力参数,当上下结构频率相重合时,往往在收进层产生很大反应。

2. 第一振型在收进结构中可以认为是近似两折线。随着突出物高宽比的增加,对槽口效应的贡献也逐渐地增加,而对基底反应的贡献逐渐地减小,特别当上部结构的频率小于下部结构的第一频率时,第一振型对基底反应的贡献占的比重很小。

3. 用降低刚度来避开共振区,以求降低层间位移是有条件的。当上部结构质量较大时,降低刚度避开共振区,并不能导致减少收进层的层间位移。为了降低突出物的反应,应尽可能在设计中不削弱收进处柱子截面,并注意使突出物的频率避开下部结构的频率。

参 考 文 献

- 〔1〕 谢闽生、麦淑良,单层突出物收进结构的地震反应,华侨大学学报,1(1986),30—40.
- 〔2〕 谢闽生、麦淑良、陈忠汉,多层突出物收进结构的地震反应,工程力学,2(1986).
- 〔3〕 J. L. Humar and E. W. Wright, Earthquake Response of Steel-Framed Multistorey Buildings with Set-Back, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 5(1977), 15—39.
- 〔4〕 钟万勰、林家浩,高层建筑振动的“鞭梢效应”,振动与冲击,2(1985).
- 〔5〕 陈光华,地震作用下多层剪切型结构弹塑性位移反应的简化计算,建筑结构学报,2(1984).

The Feature of Earthquake Response of the Structures with Set-Back Towers

Xie Minsheng Mai Suliang Chen Zhonghan

Abstract

In this paper, the earthquake response of the structures with set-back towers in elastic region and the contribution of fundamental as well as higher mode of vibration to the total earthquake response of these structures are discussed, and the feature of nonlinear dynamic behaviour of reinforced concrete structures is analyzed, and at last, a rational stiffness of the structure with set-back tower is suggested.